



DOI 10.23859/estr-220701

EDN TEDKZE

УДК 504.455+551.583+574.52

Научная статья

Особенности динамики экологических параметров Саратовского водохранилища в начале XXI века

Е.А. Шашуловская*^{}, С.А. Мосияш^{}

Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», 410002, Россия, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 152

*shash.elena2010@yandex.ru

Аннотация. Показана динамика органического вещества (ОВ), биогенных элементов и фитопланктона Саратовского водохранилища в 2001–2020 гг. в условиях климатических изменений. Установлен отрицательный тренд содержания аллохтонного ОВ и аммонийного азота. Величина стока водохранилища, изменения фосфатов и нитратов были связаны с динамикой индекса североатлантического колебания. Положительный тренд концентрации железа в водохранилище обусловлен увеличением зимнего стока в результате частых зимних оттепелей. Содержание общего и легкоокисляемого ОВ, кремния в меньшей степени связано с изменением гидрометеорологических условий. За период исследования уменьшалась общая биомасса фитопланктона и биомасса зеленых водорослей, возрастала доля цианопрокариот, упрощалась видовая структура водорослей. Метод главных компонент позволил выделить главные факторы, объединяющие содержание биогенных элементов, общую биомассу фитопланктона и основных отделов Bacillariophyta и Cyanoprokaryota, июльскую температуру воды.

Ключевые слова: органическое вещество, биогенные элементы, фитопланктон, изменение климата, индекс североатлантического колебания

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам Саратовского филиала ФГБНУ «ВНИРО» И.Г. Филимоновой, Л.В. Гришиной и Е.Г. Кузиной за помощь в обработке гидрохимического материала, а также всем сотрудникам, принимавшим участие в отборе проб.

ORCID:

Е.А. Шашуловская, <https://orcid.org/0000-0003-1072-7046>

С.А. Мосияш, <https://orcid.org/0000-0003-0875-6358>

Для цитирования: Шашуловская, Е.А., Мосияш, С.А., 2023. Особенности динамики экологических параметров Саратовского водохранилища в начале XXI века. *Трансформация экосистем* **6** (5), 11–28. <https://doi.org/10.23859/estr-220701>

Поступила в редакцию: 01.07.2022

Принята к печати: 25.10.2022

Опубликована онлайн: 01.12.2023

DOI 10.23859/estr-220701

EDN TEDKZE

UDC 504.455+551.583+574.52

Article

Characteristic features of the dynamics of environmental parameters of the Saratov Reservoir in the beginning of the 21st century

Elena A. Shashulovskaya* , Svetlana A. Mosiyash 

Saratov branch of the FSBSI "Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography", ul. Chernyshevskogo 152, Saratov, 410002 Russia

*shash.elena2010@yandex.ru

Abstract. This study, conducted in the Saratov Reservoir in 2001–2020, investigates the dynamics of organic matter (OM), nutrients and phytoplankton under climate change conditions. A negative trend in the content of allochthonous OM and ammonium nitrogen is found. The reservoir water discharge, changes in phosphates and nitrates are associated with the dynamics of the North Atlantic Oscillation Index. A positive trend of iron concentrations in the reservoir is due to an increase in winter runoff caused by frequent winter thaws. The content of total and easily oxidized OM, as well as silicon is less associated with changes in hydrometeorological conditions. During the study period, the total biomass of phytoplankton and the biomass of green algae decreased, the proportion of cyanoprokaryotes increased, and the species composition of algae became simpler. The principal components method allowed us to identify the main factors combining the content of biogenic elements, the total biomass of phytoplankton and the main divisions of Bacillariophyta and Cyanoprokaryota, and the July water temperature.

Keywords: organic matter, biogenic elements, phytoplankton, climate change, North Atlantic Oscillation Index

Acknowledgements. The authors express their gratitude to their colleagues from the Saratov branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, I.G. Filimonova, L.V. Grishina and E.G. Kuzina for their assistance in processing of hydrochemical material, and to all researchers and support staff who participated in sampling.

ORCID:

E.A. Shashulovskaya, <https://orcid.org/0000-0003-1072-7046>

S.A. Mosiyash, <https://orcid.org/0000-0003-0875-6358>

To cite this article: Shashulovskaya, E.A., Mosiyash, S.A., 2023. Characteristic features of the dynamics of environmental parameters of the Saratov Reservoir in the beginning of the 21st century. *Ecosystem Transformation* 6 (5), 11–28. <https://doi.org/10.23859/estr-220701>

Received: 01.07.2022

Accepted: 25.10.2022

Published online: 01.12.2023

Введение

Климатические изменения, наблюдаемые в последние десятилетия, приводят к трансформации водного стока рек и водохранилищ, что в итоге нарушает их водохозяйственное использование и влияет на качество воды. На большей части территории России в последние десятилетия проявляется тенденция к увеличению годового стока, связанная с общим ростом увлажненности территории. Однако в бассейнах Нижней Волги, Днепра и Дона, наоборот, зарегистрировано снижение его объема, и чаще наблюдаются маловодные годы (Многолетние колебания..., 2021; Черенкова и Сидорова, 2021). Для большинства рек Европейской части России (ЕЧР) отмечена перестройка стока в течение года: сокращение доли в половодье и увеличение в меженные сезоны (Джамалов и др., 2015; Дмитриева и Нефедова, 2018; Черенкова и Сидорова, 2021). Современное изменение термического режима приводит к частым зимним оттепелям, уменьшению промерзания почвы и сокращению сроков залегания снежного покрова. В результате на реках ЕЧР сток в течение зимнего периода увеличивается, а запасы воды в снежном покрове к началу весны сокращаются, что создает условия для уменьшения объема весеннего половодья. Подобная тенденция сохраняется и на водохранилищах, сток которых в значительной степени зарегулирован в связи с потребностями различных отраслей народного хозяйства.

В водных экосистемах потепление климата инициирует трансформацию потоков органического вещества (ОВ) и биогенных элементов, уменьшение прозрачности и содержания растворенного кислорода, повышение минерализации и др. (Линник, 2020). Изменение среды обитания влияет на структуру водных сообществ, трофические взаимодействия между видами и часто приводит к интенсификации процессов эвтрофирования (Лазарева и Соколова, 2013), показателем которых является перестройка количественных и структурных характеристик фитопланктона.

Несмотря на общие закономерности формирования и развития организмов разных трофических уровней, в каждом конкретном водоеме присутствуют специфические черты, обусловленные природной зоной, рельефом местности, степенью антропогенной нагрузки, а также удаленностью региона от основных влагонесущих потоков. На вышеперечисленные региональные особенности водосбора накладываются изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции, которые достаточно четко проявляются в увеличении темпов современного потепления на севере Евразии в зимний сезон. Регистрируемые аномалии температуры и осадков могут приводить к существенным трансформациям режима тепло-влагообеспеченности крупных регионов и повлечь за собой ощутимые последствия для природной среды (Попова и др., 2019).

Из крупномасштабных циркуляционных систем наибольший интерес для климата России представляет североатлантическое колебание (САК), сущность которого заключается в перераспределении атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой. Чередование положительных и отрицательных фаз САК вызывает большие изменения в переносах тепла и влаги, определяет температуру и интенсивность конвективного перемешивания воды, ледовый режим европейских водоемов (Лазарева и Соколова, 2013; Нестеров, 2013). В последние десятилетия САК изучается как один из возможных источников глобального потепления (Малинин и Гордеева, 2014). В связи с этим некоторые авторы делают попытку использовать статистические связи с индексом САК для прогноза направленности долговременных изменений биотических характеристик экосистем (Лазарева и Соколова, 2013; Копылов и др., 2019; Минеева, 2019).

Числа Вольфа (W) (показатели солнечной активности) наряду с САК являются маркерами глобальных процессов, связанных с изменением погодно-климатических условий. Солнечные циклы регулируют распределение биомассы фитопланктона в морях и океанах через процессы циркуляции вод, изменяющие световой режим и обеспеченность питательными веществами (Минеева, 2019).

Бассейн р. Волги, охватывающий значительную территорию ЕЧР, «интегрирует» вклад региональных климатических параметров в изменчивость ее водного стока. Саратовское водохранилище является предпоследней ступенью в огромном Волжско-Камском каскаде. По гидрологическому режиму водоем относится к речному типу с высокими проточностью и коэффициентом водообмена (18 раз в год). Водоохранилище большей частью расположено в лесостепной зоне (Герасимова, 1996). Боковая приточность в водном балансе водоема составляет в среднем 6%. Основным регулятором стока является Куйбышевское водохранилище, аккумулирующее воду в период весеннего половодья и постепенно сбрасывающее накопленный объем в течение межени.

Цель настоящей работы – оценить динамику основных гидрохимических компонентов, определяющих трофический уровень, и показателей фитопланктона Саратовского водохранилища; установить связь их межгодовых колебаний с трансформацией климатических факторов в начале XXI в.

Материал и методы

Гидрохимический материал отбирали в 2001–2020 гг. на русловых и прибрежных участках Саратовского водохранилища по стандартным мониторинговым разрезам с помощью батометра Рутнера (Рис. 1). Отбор проб проводили в течение вегетационного сезона: весной (май), летом (июль – август) и осенью (октябрь – ноябрь). Пробы воды на русловых участках отбирали с поверхностного и придонного (0.5 м от дна) горизонтов, на прибрежных участках – только с поверхности. Гидрохимический анализ включал определение содержания органического вещества (цветности, перманганатной (ПО) и бихроматной (ХПК) окисляемости, биохимического потребления кислорода (БПК₅)) и биогенных элементов (минеральных форм азота и фосфора, общего железа, кремния). Общий минеральный азот рассчитывали как сумму его минеральных форм – аммонийной (N-NH₄), нитритной (N-NO₂) и нитратной (N-NO₃). Применяли общепринятые методики титриметрического и фотометрического анализов (Руководство..., 1977). Для сравнения использовали показатели химического состава воды Саратовского водохранилища в 1969–1974 гг., заимствованные из работ Н.А. Герасимовой (1996) и С.Г. Котляр (1978).

Отбор проб фитопланктона проводили в 2001–2020 гг. на постоянных мониторинговых разрезах одновременно с отбором воды для гидрохимического анализа (Рис. 1). Обработка гидробиологического материала проводилась по унифицированным методикам (Далечина и Джаяни, 2014). Характеристику фитопланктона в 1969–2020 гг. оценивали по работам Н.А. Герасимовой (1996), И.Н. Далечинной и Е.А. Джаяни (2012, 2014), Е.А. Шашуловской с соавторами (2021).



Рис. 1. Карта-схема Саратовского водохранилища.

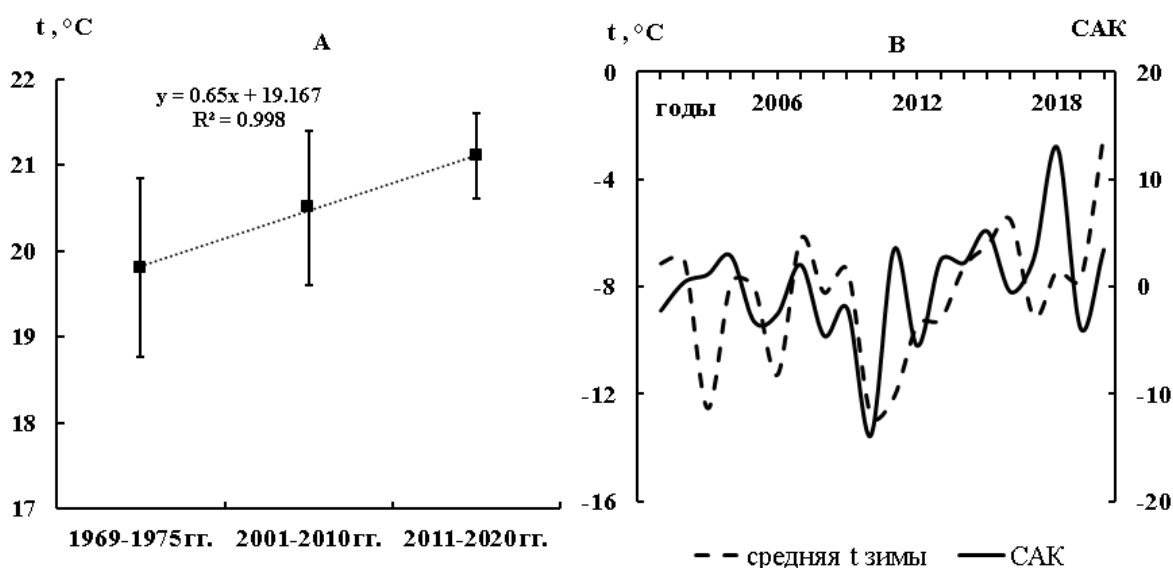


Рис. 2. Динамика средней за июль температуры воды (средние в 95% доверительном интервале) в 1969–2020 гг. (А) и динамика годового индекса САК и зимней температуры воздуха в 2001–2020 гг. (В).

Объем водного стока рассчитывали по данным сброса через Саратовский гидроузел, доступным на сайте ПАО «Русгидро»¹. Трансформированные ряды значений индекса САК и чисел Вольфа брали на сайтах National Weather Service² и Space Weather Services³. Данные по количеству осадков и температуре воздуха в рассматриваемый период были получены из ресурса ВНИИГМИ-МЦД⁴ рассчитаны как средние значения по пунктам, расположенным в бассейне Средней Волги (города Нижний Новгород и Казань).

Статистическая обработка данных проводилась в программе специализированного пакета Statgraphics Centurion XVI, версия 16.1.11. Для анализа результатов использовали средневегетационные концентрации исследуемых показателей. Взаимосвязь между параметрами определяли с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Для структурирования многомерного массива исходных гидрохимических показателей и биомассы фитопланктона использовали метод главных компонент.

Результаты и обсуждение

Климатические и гелиофизические особенности

Начало XXI в. характеризуется увеличением июльской температуры воды в Саратовском водохранилище: с 70-х гг. прошлого века ее прирост составил ~ 0.7 °C (Рис. 2А). В связи с высокой проточностью и географическим расположением Саратовского водохранилища летние температуры воды в нем были ниже, чем в Волгоградском (Shashulovskaya et al., 2021). Например, средняя температура в июле в исследуемый период была на 2 °C ниже и составила 20.8 °C. Летом аномально жаркого 2010 г. в Саратовском водохранилище средняя температура воды составила 23.5 °C, в то время как в Рыбинском она достигала 24.5 °C (Копылов и др., 2019), в Волгоградском – 26.2 °C (Shashulovskaya et al., 2021).

¹ Филиал ПАО «РусГидро» – «Волжская ГЭС», Электронный ресурс. URL: <http://www.volges.rushydro.ru> (дата обращения: 16.11.2021).

² National Weather Service, Climate Prediction Center, USA. Web page. URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml> (дата обращения: 13.04.2022).

³ Space Weather Services, Australian Space Weather Forecasting Centre, AUS. Web page. URL: <https://www.sws.bom.gov.au/Solar/1/6> (дата обращения: 14.04.2022).

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД), RUС. Интернет-ресурс. URL: <http://www.meteo.ru> (дата обращения 20.04.2022).

С 2001 по 2020 г. на территории Средней Волги зарегистрирован рост зимних температур приземного воздуха, особенно заметный с 2011 г. (Рис. 2В). Это отражает общую тенденцию начала XXI в., характерную для большей территории ЕЧР (Джамалов и др., 2015; Черенкова и Сидорова, 2021).

Колебания годового водного стока Саратовского водохранилища в период 2001–2020 гг. происходили в интервале 195–299 км³ (Табл. 1). Наиболее многоводными были 2005, 2007 и 2017 гг. (Табл. 1). В первое десятилетие отмечено снижение объема стока ($R^2 = 0.27$, $p = 0.12$), с 2011 по 2020 гг. наметилась тенденция к его увеличению ($R^2 = 0.29$, $p = 0.11$). За период 2001–2020 гг. произошли внутригодовые изменения: его доля в общем объеме зимой повысилась с 16 до 19%, а в период половодья, наоборот, уменьшилась на 5%.

Наибольшее количество осадков выпало в 2001, 2004, 2013, 2015 гг., а наименьшее – в 2008, 2018, 2020 гг. (Табл. 1). За исследуемый период отмечено небольшое снижение годовой суммы осадков ($R^2 = 0.20$, $p = 0.05$). В связи с зарегулированием величина годового стока водохранилища и количество осадков не связаны между собой.

Маркерами глобальных процессов, влияющих на гидрологические, гидрофизические и биологические характеристики водоемов, являются индекс САК и числа Вольфа (Копылов и др., 2019; Лазарева и Соколова, 2013; Минеева, 2019).

Североатлантическое колебание – одна из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в Северном полушарии. За существующий период инструментальных наблюдений в межгодовой динамике выделяют две фазы индекса САК – усиление и ослабление, для которых отмечаются значимые тренды с высокими коэффициентами детерминации (Малинин и Гордеева, 2014). В период 2001–2010 гг. отмечено снижение годовых значений САК ($R^2 = 0.34$, $p = 0.07$), являющееся продолжением отрицательной фазы, начавшейся в 1993 г. (Малинин и Гор-

Табл. 1. Гидроклиматические характеристики Саратовского водохранилища в 2001–2020 гг.

Год	Т июля, °С	Осадки, мм	Объем стока, км ³	САК	W
2001	21.1	744	271	-2.19	170.2
2002	20.8	690	257	0.47	176.8
2003	19.5	650	242	1.17	109.0
2004	20.0	700	258	2.91	68.8
2005	19.9	635	283	-3.21	48.6
2006	20.0	679	209	-2.49	26.1
2007	20.0	662	286	2.08	12.7
2008	19.4	594	239	-4.54	4.6
2009	21.0	655	235	-2.02	4.9
2010	23.5	646	195	-13.83	25.4
2011	22.0	684	199	3.52	80.3
2012	21.7	659	242	-5.47	82.1
2013	20.9	707	273	2.52	96.9
2014	21.5	673	223	2.24	121.8
2015	19.5	709	197	5.20	70.5
2016	21.0	693	266	-0.46	36.9
2017	20.7	677	288	2.71	19.5
2018	21.4	589	272	13.00	6.6
2019	20.7	618	228	-3.82	3.6
2020	21.4	520	299	3.49	8.8

деева, 2014). С 2011 г. началась положительная динамика индекса САК (Рис. 2В). Чем выше значения этого показателя, тем более интенсивным является зональный перенос воздушных масс с акватории Северной Атлантики на Европейский континент. При этом происходит значительное увеличение количества выпавших осадков на севере и в центре ЕЧР. Чередование положительных и отрицательных фаз в частотной структуре САК определяет термический режим водоемов и интенсивность перемешивания воды (Копылов и др., 2019).

В исследуемый период отмечено два максимальных (2001–2002 и 2011–2014 гг.) и два минимальных (2008–2009 и 2018–2020 гг.) периода солнечной активности в 11-летних циклах, характеризующихся числами Вольфа (Табл. 1). Снижение солнечной активности в 2001–2010 гг. совпало с уменьшением объема стока водохранилища и индекса САК до минимальных значений в 2010 г.

Органическое вещество

Количественное содержание ОВ является одним из важнейших факторов, определяющих качество воды в водных экосистемах, и, как следствие, условия существования гидробионтов. Основная масса ОВ поступает в Саратовское водохранилище из расположенного выше Куйбышевского водохранилища. Аллохтонное ОВ гумусовой природы в основном характеризуют показатели цветности воды и ПО (Лозовик и др., 2017).

В 2011–2020 гг. цветность воды в Саратовском водохранилище колебалась от 23 до 44 град. цветности (Табл. 2). Средневегетационные значения этого показателя синхронно изменялись с величиной стока искусственного водоема ($r = 0.84$, $p = 0.00$). Наиболее сильная связь отмечена между значениями цветности воды и объемом стока в весенний и, вероятно, в зимний периоды по аналогии с Волгоградским водохранилищем (Шашуловская и Мосияш, 2019). При обильных дождевых паводках повышенные величины цветности регистрировались летом и осенью. В первые годы существования водохранилища цветность воды колебалась практически в тех же пределах (15–42 град.), что и в настоящее время.

Цветность и ПО связаны значимыми корреляционными отношениями, так как характеризуют одни и те же группы ОВ. Между величинами ПО и стока водохранилища также отмечена тесная связь ($r = 0.70$, $p = 0.03$). В период 2001–2010 гг. регистрировалась отрицательная тенденция изменения этих показателей (Рис. 3А). В 2011–2020 гг. при увеличении объема стока колебания ПО происходили на одном уровне (Рис. 3В). Весной величины цветности воды и ПО определяются привнесением гумусовых веществ с терригенным стоком половодья. В вегетационный сезон в количественное содержание этой группы веществ вносят вклад процессы образования автохтонного ОВ.

При снижении величины стока в отрицательную фазу САК уменьшается количество поступающего в водохранилище аллохтонного ОВ, а при возрастании индекса атмосферной циркуляции увеличивается сток водохранилища и количество ОВ этой группы.

Бихроматная окисляемость, характеризующая содержание общего ОВ, в начале XXI в. изменялась в пределах 21–45 мгО/л и в среднем была несколько ниже, чем в первые годы существования водохранилища (Табл. 2). Колебания показателя не связаны с изменением стока. В зимний период значения ХПК и ПО изменяются синхронно (Шашуловская и Мосияш, 2019). Вероятно, ОВ зимой в основном представлено гуминовыми и фульвокислотами, определяющими цветность

Табл. 2. Содержание органического вещества в воде Саратовского водохранилища в различные периоды его существования. «–» – данные отсутствуют; min–max – диапазон колебания показателя, $M \pm m$ – среднее значение и его ошибка.

Показатель	1969–1974 гг.		2001–2010 гг.		2011–2020 гг.	
	min–max	$M \pm m$	min–max	$M \pm m$	min–max	$M \pm m$
Цветность, град.	15–42	25 ± 1	–	–	23–44	31 ± 2
ПО, мгО/л	7.8–10.9	9.8 ± 0.3	6.3–10.5	8.8 ± 0.4	6.1–9.5	7.6 ± 0.3
ХПК, мгО/л	26–33	30 ± 1	21–45	28 ± 3	22–29	25 ± 1
БПК ₅ , мгО ₂ /л	1.1–1.8	1.3 ± 0.1	1.2–2.1	1.6 ± 0.1	1.1–2.5	1.6 ± 0.2
ПО/ХПК, %	30–33	32 ± 1	30–37	33 ± 2	28–33	31 ± 2
БПК ₅ /ХПК, %	–	4.3 ± 0.4	–	5.8 ± 0.5	–	6.4 ± 0.7

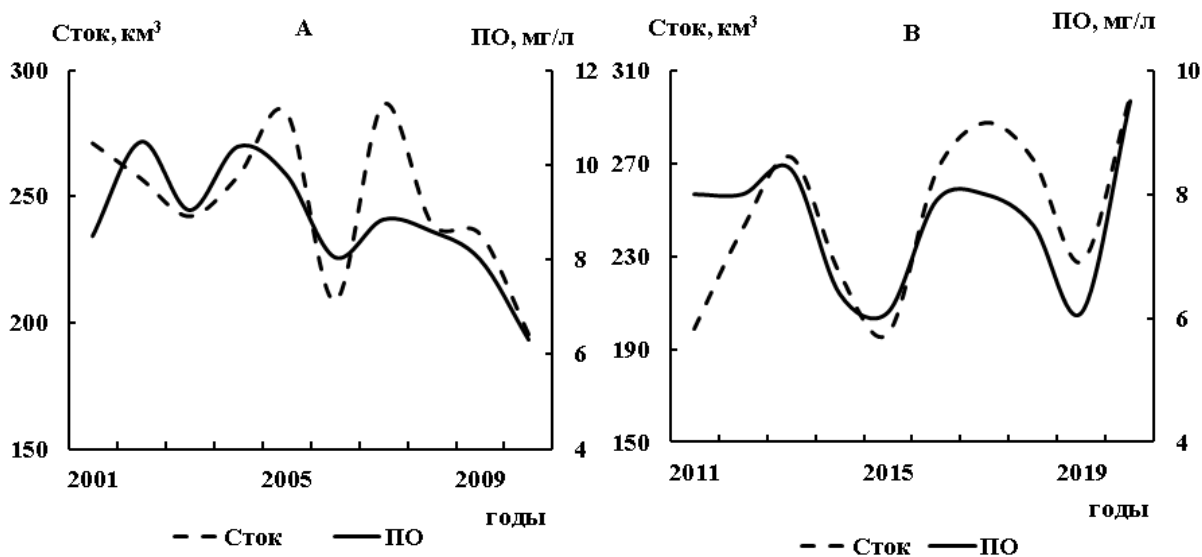


Рис. 3. Изменения величин стока и ПО в периоды 2001–2010 гг. (А) и 2011–2020 гг. (В).

воды. В вегетационный период при увеличении численности и биомассы планктонных организмов на динамику ОВ в водоеме оказывают влияние биопродукционные и минерализационные процессы. В это время изменяется характер взаимосвязи между показателями содержания различных групп ОВ. За исследуемый период в динамике показателя ХПК в воде Саратовского водохранилища не обнаружено выраженных тенденций.

Пределы колебания содержания легкоокисляемого ОВ в исследуемый период составили 1.1–2.5 мгО₂/л (Табл. 2). Прослеживалось снижение величины БПК₅ в период 2001–2010 гг. и некоторое повышение во втором десятилетии XXI в. при увеличении амплитуды колебания значений этого показателя. Повышенные величины БПК₅, отмеченные нами в зимний период в Волгоградском водохранилище (Шашуловская и Мосияш, 2019), позволяют предположить, что и в Саратовском водохранилище в динамике этого показателя значительную роль играет водосбор, что обуславливает его сходство с аллохтонным ОВ. Однако отношение БПК₅/ХПК, характеризующее долю лабильного ОВ, за исследованный период составило 5–6% и несколько увеличилось по сравнению с 1969–1974 гг. (Табл. 2), очевидно, в результате усиления интенсивности биопродукционных процессов на фоне повышения температуры воды.

Биогенные элементы

Многолетняя динамика общего минерального азота, одного из двух основных биогенных элементов, влияющих на биологическую продуктивность, в начале XXI в. происходила в пределах 0.41–2.32 мгN/л (Табл. 3). За период 2001–2020 гг. наблюдалось снижение содержания всех форм минерального азота, за исключением азота нитритов. Наиболее высокие коэффициенты детерминации характерны для трендовых моделей динамики аммония и общего минерального азота ($R^2 = 0.62$ и 0.37 соответственно при $p < 0.05$). Причем в последнее десятилетие тренд прослеживался более отчетливо. Снижение содержания аммонийного азота в начале XXI в. отмечено в воде верхневолжского Ивановского водохранилища (Кирпичникова и др., 2020), а также в искусственных водоемах Днепровского каскада (Жежеря и др., 2021). Возможной причиной подобного явления может являться уменьшение объема весеннего притока, а также более активное вовлечение азота в биогеохимические циклы при повышении температуры.

Высокие коэффициенты детерминации отмечены в период с 2001 по 2010 гг. для азота аммония, нитратов, а соответственно и общего минерального азота ($R^2 = 0.44–0.79$ при $p < 0.05$) (Рис. 4А). В 2011–2020 гг. выраженных тенденций в межгодовых изменениях содержания аммония не обнаружено, а концентрация нитратов изменялась согласованно с индексом САК (Рис. 4В).

Нитраты являются доминирующей формой минерального азота в Саратовском водохранилище. Их сезонная динамика, как правило, хорошо выражена и характеризуется максимальными

Табл. 3. Содержание биогенных элементов в воде Саратовского водохранилища в разные периоды его существования.

Показатель	1969–1974 гг.		2001–2010 гг.		2011–2020 гг.	
	min–max	M ± m	min–max	M ± m	min–max	M ± m
N-NH ₄ , мг/л	0.14–0.72	0.36 ± 0.08	0.26–0.61	0.38 ± 0.04	0.09–0.27	0.19 ± 0.02
N-NO ₂ , мкг/л	4–44	22 ± 6	5–22	12 ± 2	9–37	19 ± 4
N-NO ₃ , мг/л	0.29–0.86	0.48 ± 0.09	0.12–0.95	0.50 ± 0.08	0.16–0.64	0.40 ± 0.04
N мин., мг/л	0.51–1.19	0.86 ± 0.11	0.41–2.32	0.98 ± 0.18	0.44–0.77	0.63 ± 0.04
Фосфор минеральный, мкг/л	28–74	51 ± 9	37–75	54 ± 4	24–84	48 ± 6
Железо, мг/л	0.15–0.32	0.18 ± 0.03	0.07–0.22	0.15 ± 0.02	0.17–0.37	0.26 ± 0.02
Кремний, мг/л	1.5–3.4	2.3 ± 0.4	2.9–4.1	3.6 ± 0.5	2.9–3.8	3.3 ± 0.1

концентрациями в весенний период за счет присутствия трансформированных зимних вод и влияния терригенного стока с паводковыми водами. Летом концентрация нитратного азота снижается в связи с расходом на питание автотрофов, осенью – возрастает за счет минерализационных процессов (Шашуловская, 2022).

Амплитуда колебания и средние значения аммония и нитратов в 70-е гг. прошлого столетия и в первое десятилетие XXI в. близки. Однако в 2011–2020 гг. средняя концентрация аммония, в отличие от нитратов, уменьшилась в 2 раза (Табл. 3).

Содержание нитритного азота было низким (6–25 мкгN/л), но в отдельные годы (2011–2014 гг. и 2019–2020 гг.) на некоторых станциях Саратовского водохранилища зарегистрировано существенное повышение количества нитритов, что может быть связано с поступлением загрязняющих веществ.

Концентрация минерального фосфора в 2001–2020 гг. колебалась в пределах 24–84 мкг/л (Табл. 3). Изменения содержания фосфора происходили циклически (Рис. 5А). В период 2001–2011 гг. наблюдалась отрицательная тенденция средневегетационных значений рассматриваемого показателя, причем его величины возрастали в маловодные годы. В первое десятилетие XXI в. отмечена слабая корреляция со стоком. С 2012 г. максимальные значения концентрации фосфора наблюдались, как правило, в многоводные годы. Это свидетельствует об усилении роли гидрологических факторов в генезисе этого элемента. Особенностью сезонной динамики минерального фосфора является повышение его содержания к осени (Шашуловская, 2022), очевидно, за счет внутренней биогенной нагрузки – гидролого-гидрофизических и химико-биологических внутриводоемных процессов, тесно связанных с формированием зон аноксии в придонных слоях водохранилища. В период 2012–2020 гг. динамика фосфатов происходила согласованно с изменениями САК (Рис. 5А). Амплитуда колебания и средние концентрации фосфатов в начальный период существования водохранилища и в последние десятилетия близки (Табл. 3), что свидетельствует об уравновешенности внутриводоемных и гидрологических факторов в генезисе этого элемента в экосистеме водохранилища.

Средневегетационные концентрации железа изменялись в интервале 0.07–0.37 мг/л (Табл. 3). За исследуемый период отмечен достоверный положительный тренд содержания данного элемента ($R^2 = 0.77$, $p = 0.00$) (Рис. 5В). Максимальные концентрации железа наблюдали весной (Шашуловская, 2022), когда зарегистрирована высокая корреляционная связь этого показателя и цветности воды ($r = 0.85–0.88$, $p < 0.05$).

Увеличение количества оттепелей и жидких осадков в зимний период приводит к возрастанию объема вод, богатых гумусовым веществом с большим содержанием природного железа, поступающих из водохранилищ Верхней Волги и Камы (Shashulovskaya et al., 2021). В последние десятилетия увеличение концентрации этого элемента отмечается и в других водных объектах, расположенных на заболоченных территориях северных регионов мира, где с водосборных территорий в водотоки и водоемы также поступает большое количество ОВ гумусовой природы. Так, увеличение концентрации железа было обнаружено во многих северных водоемах Европы и Америки (Калинкина и др., 2018; Björnerås et al., 2017).

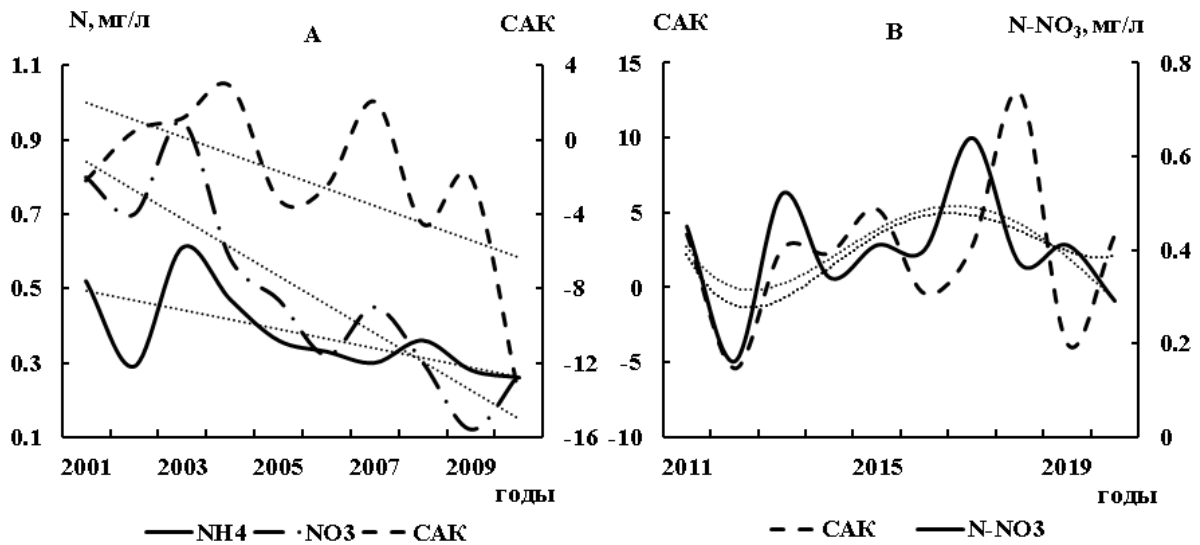


Рис. 4. Динамика минеральных форм азота в воде Саратовского водохранилища и индекса САК в 2001–2010 гг. (А) и 2011–2020 гг. (В). Пунктирными линиями обозначены основные тренды.

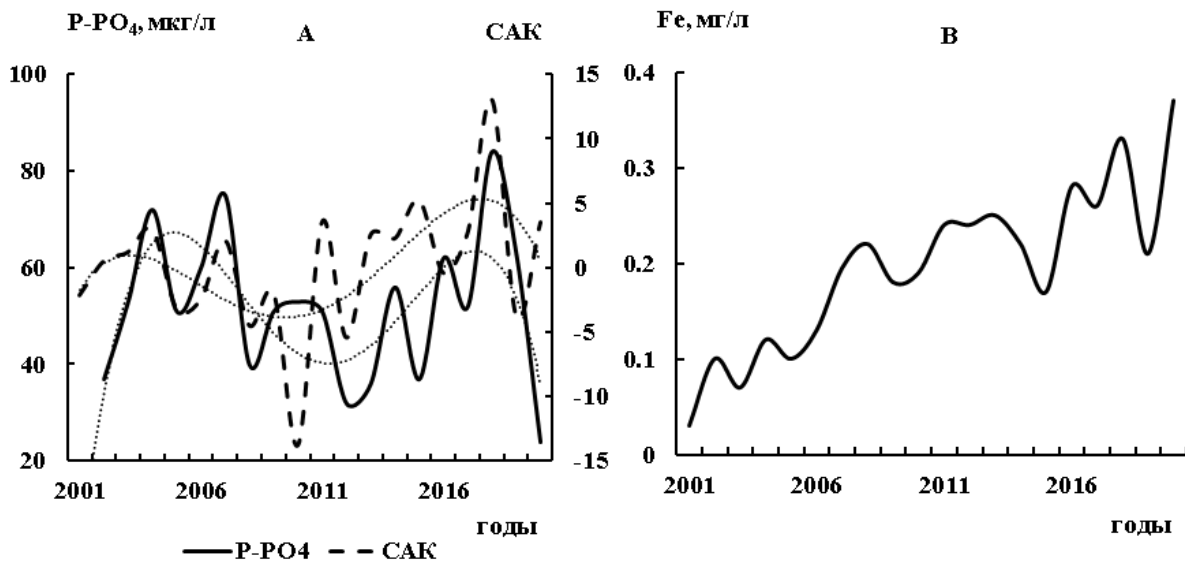


Рис. 5. Динамика содержания фосфатов и индекса САК (А) и общего железа (В) в воде Саратовского водохранилища в 2001–2020 гг. Пунктирными линиями обозначены полиномиальные тренды.

Содержание кремния варьировало в узких пределах. Его среднесезонные концентрации в настоящее время незначительно отличались от количественных значений в начальный период существования Саратовского водохранилища (Табл. 3).

Считается, что при положительных значениях САК зимы становятся мягче, количество осадков увеличивается. В фазы с отрицательными значениями САК наблюдается похолодание и уменьшение количества осадков (Копылов и др., 2019). Период 2001–2010 гг. характеризуется снижением количества осадков и более суровыми зимами (Рис. 2В). К 2010 г. июльская температура воды увеличивается до максимальной, а индекс САК и числа Вольфа снижаются до минимальных значений (Табл. 1). Следует отметить, что наиболее задокументированным является статистическая связь САК с температурой воздуха, что наиболее часто проявляется в северо-западной Европе (Kukushkin, 2020; Markovic et al., 2013; Ottersen et al., 2001). Однако связь САК и климата в различных частях Европы нестабильна. Например, температура воды Дуная на территории Австрии

находилась под влиянием САК только во время его положительной фазы (1981–1994 гг.). В более низких широтах (в Сербии) связь температуры воды в этой реке с изменчивостью САК отсутствовала (Markovic et al., 2013). Для исследования крупномасштабных экологических явлений (САК) и лежащих в их основе процессов требуются не только долгосрочные наборы данных, но и междисциплинарный взгляд (Báez et al., 2021; Ottersen et al., 2001).

По результатам наших исследований с 2011 г. на Саратовском водохранилище отмечена слабая тенденция снижения летней температуры воды. Одновременно увеличивается индекс САК и начинается новый 11-летний цикл солнечной активности. Такие изменения глобальных климатических факторов, очевидно, привели к изменению силы связи между рассматриваемыми показателями. Возрастала величина водного стока, динамика нитратов и фосфатов происходила согласованно с изменениями индекса САК (Рис. 4В, Рис. 5А). Динамика общего и легкоокисляемого ОВ, а также железа общего и кремния не были связаны с колебаниями индекса САК.

Фитопланктон

Сообщество микроводорослей одним из первых реагирует на изменения гидрохимического и термического режима. Оно является критерием трофического состояния экосистемы водоемов. В начальный период существования Саратовского водохранилища (1969–1974 гг.) ежегодно встречалось от 192 до 304 таксонов фитопланктона рангом ниже рода (Герасимова, 1996). Наибольшее число видов зарегистрировано в отделах Bacillariophyta и Chlorophyta. Биологическое лето характеризовалось максимальными показателями численности и биомассы фитопланктона, в планктоне возрастала роль цианопрокариот, которые чаще преобладали по численности, реже – по биомассе. Наибольшее развитие получали внутривидовые таксоны из родов *Microcystis*, *Anabaena* и *Oscillatoria*. Колебания численности фитопланктона в летний период 1969–1974 гг. составили 0.71–10.36 млн кл./л, биомассы – 0.27–2.26 г/м³ (Герасимова, 1996).

За последние два десятилетия летняя биомасса фитопланктона изменялась от 0.23 до 1.45 мг/дм³, зарегистрированы отрицательные тренды биомассы Chlorophyta, Dinophyta, Euglenophyta (Шашуловская и др., 2021). Произошло упрощение видовой структуры фитопланктона Саратовского водохранилища до 112–182 таксонов. В летний период 2000–2008 гг. средняя численность микроводорослей составляла 5.6 млн кл./л, биомасса – 1.26 мг/л (Далечина и Джаяни, 2012). Основу численности по-прежнему формировали виды из отдела Cyanoprokaryota, на долю которых приходилось 65–90%. Биомасса фитопланктона в равной степени была представлена Bacillariophyta, Cyanoprokaryota, Chlorophyta и Cryptophyta с преобладанием того или иного отдела водорослей в разные годы (Далечина и Джаяни, 2012).

В настоящее время значительную долю в численности и биомассе фитопланктона стали занимать мелкоклеточные формы: из диатомовых водорослей – виды родов *Cyclotella*, *Stephanodiscus*, *Skeletonema subsalsum* (Cleve-Euler) Bethge, а также *Nitzschia* sp., который в больших количествах встречался в колониях цианопрокариот *Microcystis aeruginosa* Kutz.; из криптофитовых – *Chroomonas acuta* Uterm. (Далечина и Джаяни, 2014). Возрастание обилия криптофитовых водорослей и увеличение мелкоклеточных видов отмечено в последние два десятилетия также и в других водохранилищах Волжского каскада (Корнева и др., 2021).

В первое десятилетие XXI в. летняя биомасса была сформирована представителями отделов Bacillariophyta, Cryptophyta и Chlorophyta, а с 2010 г. в состав доминирующих групп по биомассе вошли и Cyanoprokaryota (Рис. 6). С 2003 г. отмечен достоверный многолетний тренд увеличения биомассы цианопрокариот ($R^2 = 0.80$, $p = 0.00$) (Далечина и Джаяни, 2014). Увеличение обилия и разнообразия цианопрокариот и выравнивание их биомассы по продольной оси Волжско-Камского каскада в направлении от Верхней Волги к Нижней отмечено и другими исследователями (Корнева и др., 2021).

За исследованный период изменилось соотношение основных систематических групп фитопланктона Саратовского водохранилища. Если в 1969–1974 гг. преобладали диатомовые водоросли, составлявшие 60% биомассы, то в 2003–2013 гг. на их долю приходилось 20–30%. Биомасса Cyanoprokaryota с 22% на раннем этапе существования водохранилища увеличилась в последние десятилетия до 30% от общей биомассы (Рис. 6). На прочие группы фитопланктона (криптофитовые, динофитовые, эвгленовые) в 70-е годы прошлого столетия приходилось 9%, в настоящее время их доля возросла в среднем до 40%.

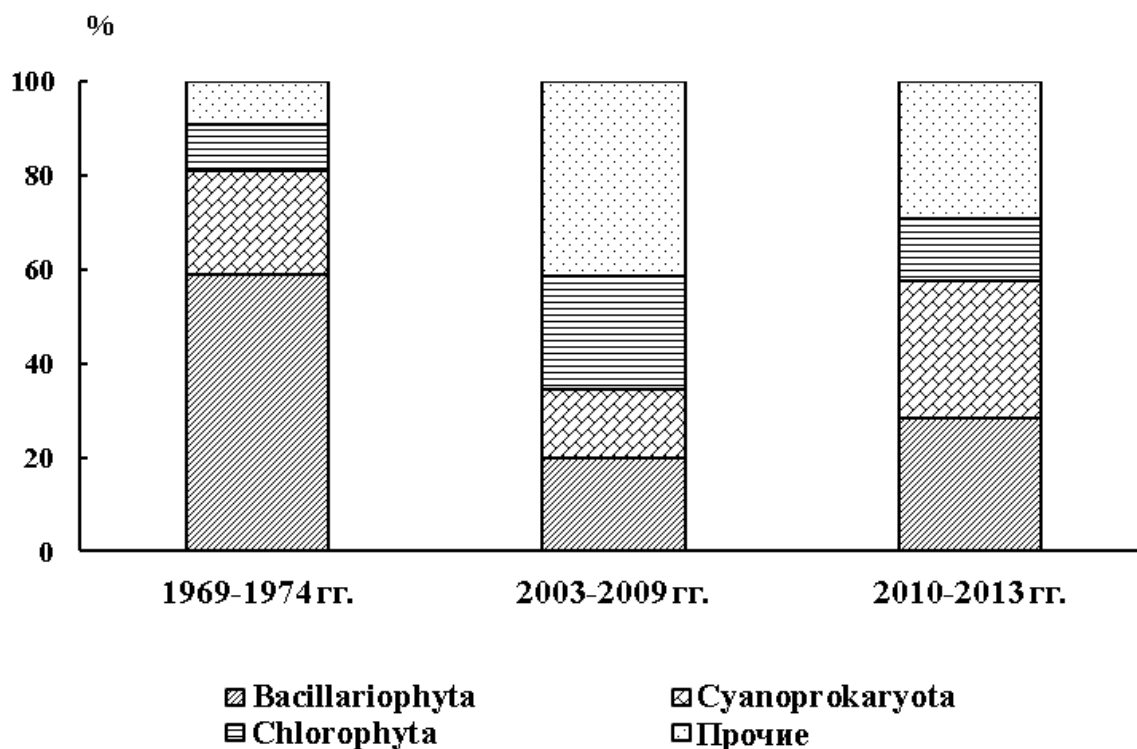


Рис. 6. Соотношение биомассы основных систематических групп фитопланктона Саратовского водохранилища в различные периоды 1969–2013 гг. (данные за 1969–1974 гг. приведены по Герасимова, 1996; за 2003–2009 гг. и 2010–2013 гг. – по Далечина и Джаяни, 2014).

Температура воды, наряду с обеспеченностью биогенными элементами, относится к главным абиотическим факторам, определяющим уровень развития фитопланктона в водоемах. Очевидно, что глобальные атмосферные процессы и уровень солнечной активности, характеризующие индексом САК и числами Вольфа, не могут не влиять на развитие фитопланктона. Некоторые авторы отмечают положительную корреляцию между годовыми значениями САК и первичной продукцией фитопланктона (Копылов и др., 2019; Ottersen et al., 2001), концентрацией суммарного хлорофилла (Mineeva, 2021). Отмечена также сильная статистическая связь между суммарным хлорофиллом, хлорофиллом диатомовых водорослей и цианопрокариот и числами Вольфа (Mineeva, 2021).

Множественный корреляционный анализ не выявил связь биомассы фитопланктона с летней температурой воды, годовым индексом САК, числами Вольфа и рассматриваемыми гидрохимическими компонентами. Прямые сопоставления температуры воды и биомассы фитопланктона, проведенные за многолетний период на Можайском водохранилище, также обнаружили слабую скоррелированность этих показателей, что, по мнению авторов, объясняется сложным внутренним водообменом и циркуляцией слоев в водной толще (Даценко и Эдельштейн, 2021). На отсутствие тесной статистической связи биомассы фитопланктона и биогенных элементов из-за сложных многофакторных воздействий на альгоценоз указывает Н.М. Минеева с соавторами (2021).

Применение метода главных компонент позволило выделить четыре ведущих фактора, вбирающих 82% общей дисперсии и объединяющих содержание биогенных элементов, общую биомассу фитопланктона и основных его отделов (Bacillariophyta и Cyanoprokaryota). С первой главной компонентой тесно связаны общая биомасса фитопланктона, общий минеральный азот и кремний. Вторая компонента интегрирует содержание железа и величину годового стока, третья – минеральный фосфор и его соотношение с азотом (N/P). С четвертым главным фактором связаны биомасса Bacillariophyta и Cyanoprokaryota и июльская температура воды (Шашуловская и др., 2021).

Заключение

Таким образом, в первые два десятилетия XXI в. к особенностям динамики экологических параметров Саратовского водохранилища можно отнести следующие: отрицательные тренды содержания аллохтонного ОВ и аммонийного азота, достоверное увеличение содержания железа, уменьшение общей биомассы фитопланктона и зеленых водорослей, повышение доли цианопрокариот, упрощение видовой структуры водорослей.

Проведенные исследования позволили выделить приоритетные факторы, влияющие на динамику основных гидрохимических компонентов в Саратовском водохранилище в 2001–2020 гг. Наблюдаемый отрицательный тренд содержания аллохтонного ОВ и аммонийного азота, по-видимому, вызван снижением годового количества осадков в стокоформирующей зоне. Изменения фосфатов и нитратов в определенной степени связаны с динамикой индекса САК. Положительный тренд концентрации железа, вероятно, обусловлен увеличением зимнего стока вследствие повышения температур в холодный сезон.

Метод главных компонент позволил выделить главные факторы, объединяющие содержание биогенных элементов, общую биомассу фитопланктона и основных его отделов Bacillariophyta и Cyanoprokaryota, июльскую температуру воды. Очевидно, дальнейшее повышение температуры воды в результате климатической трансформации будет являться стимулирующим фактором развития цианопрокариот в Саратовском водохранилище.

Список литературы

- Герасимова, Н.А., 1996. Фитопланктон Саратовского и Волгоградского водохранилищ. ИЭВБ РАН, Тольятти, Россия, 198 с.
- Далечина, И.Н., Джаяни, Е.А., 2012. Фитопланктон Саратовского водохранилища в 2000–2008 гг. *Материалы докладов Всероссийской конференции «Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ»*. Борок, Россия, 57–58.
- Далечина, И.Н., Джаяни, Е.А., 2014. Динамика видового состава и количественных показателей фитопланктона в водохранилищах Нижней Волги за 2003–2013 гг. *Материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию ГосНИОРХ «Рыбохозяйственные водоемы России: фундаментальные и прикладные исследования»*. Санкт-Петербург, Россия, 287–291.
- Даценко, Ю.С., Эдельштейн, К.К., 2021. Влияние температуры воды на развитие фитопланктона в водохранилищах. *Тезисы докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И.Д. Папанова РАН «Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции»*. Ярославль, Россия, 57.
- Джамалов, Р.Г., Фролова, Н.Л., Телегина, Е.А., 2015. Изменение зимнего стока рек Европейской части России. *Водные ресурсы* 15 (6), 581–588. <http://www.doi.org/10.7868/S0321059615060036>
- Дмитриева, В.А., Нефедова, Е.Г., 2018. Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона. *Вопросы географии* 145, 285–297.
- Жежеря, В.А., Жежеря, Т.П., Линник, П.М., 2021. Біогенні речовини у воді водосховищ Дніпровського каскаду після зарегулювання стоку Дніпра. *Гідробіологічний журнал* 6, 89–109.
- Калинкина, Н.М., Филатов, Н.Н., Теканова, Е.В., Балаганский, А.Ф., 2018. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений. *Региональная экология* 2, 65–73.
- Кирпичникова, Н.В., Лапина, Е.Е., Кудряшова, В.В., 2020. Многолетняя динамика содержания азота и фосфора в грунтовых водах водосбора Ивановского водохранилища. *Водные ресурсы* 47 (5), 536–545. <http://www.doi.org/10.31857/S0321059620050107>

- Копылов, А.И., Масленникова, Т.С., Косолапов, Д.Б., 2019. Сезонные и межгодовые колебания первичной продукции фитопланктона в Рыбинском водохранилище: влияние погодных и климатических изменений. *Водные ресурсы* 46 (3), 270–277. <http://www.doi.org/10.31857/S0321-0596463270-277>
- Корнева, Л.Г., Соловьева, В.В., Митропольская, И.В., Макарова, О.С., Сиделев, С.И., 2021. Многолетняя динамика и распределение фитопланктона крупных равнинных водохранилищ Европейской части РФ. *Тезисы докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И.Д. Папанова РАН «Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции»*. Ярославль, Россия, 102.
- Котляр, С.Г., 1978. Влияние загрязнения на гидрохимический режим Саратовского водохранилища. *Труды Саратовского отделения ГосНИОРХ* 16, 26–38.
- Лазарева, В.И., Соколова, Е.А., 2013. Динамика и фенология зоопланктона крупного равнинного водохранилища: отклик на изменение климата. *Успехи современной биологии* 133 (6), 564–574.
- Линник, П.М., 2020. Кліматичні зміни як важливий чинник формування хімічного складу поверхневих вод у сучасних умовах (огляд). *Гідробіологічний журнал* 56 (5), 87–106.
- Лозовик, П.А., Зобкова, М.В., Рыжаков, А.В., Зобков, М.Б., Ефремова, Т.А., Сабылина, А.В., Ефремова, Т.В., 2017. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество природных вод: кинетические и термодинамические закономерности трансформации, количественный и качественный составы. *Доклады академии наук* 477 (6), 728–732.
- Малинин, В.Н., Гордеева, С.М., 2014. Североатлантическое колебание и увлажнение Европейской территории России. *Общество. Среда. Развитие* 31 (2), 191–198.
- Минеева, Н.М., 2019. Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах Верхней Волги (2005–2016 гг.). *Биология внутренних вод* 2-1, 33–41. <http://www.doi.org/10.1134/S0320965219020104>
- Минеева, Н.М., Степанова, И.Э., Семадени, И.В., 2021. Биогенные элементы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Верхней Волги. *Биология внутренних вод* 1, 21–34. <http://www.doi.org/10.31857/S0320965221010095>
- Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: научно-прикладной справочник, 2021. Георгиевский, В.Ю. (ред.). РИАН, Санкт-Петербург, Россия, 190 с.
- Нестеров, Е.С., 2013. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. Триада, Москва, Россия, 144 с.
- Попова, В.В., Бабина, Е.Д., Георгиади, А.Г., 2019. Климатические факторы изменчивости стока Волги во второй половине XX – начале XXI вв. *Известия РАН. Серия географическая* 4, 63–72.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши, 1977. Семенов, А.Д. (ред.). Гидрометеиздат, Ленинград, СССР, 542 с.
- Черенкова, Е.А., Сидорова, М.В., 2021. Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России. *Водные ресурсы* 48 (3), 260–269. <http://www.doi.org/10.31857/S0321059621030068>
- Шашуловская, Е.А., 2022. О необходимости региональной регламентации органического вещества и биогенных элементов в нижеволжских водохранилищах. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление* 1, 25–38. http://www.doi.org/10.35567/19994508_2022_1_2

Шашуловская, Е.А., Мосияш, С.А., 2019. Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища в подледный (зимний) период. *Сборник статей международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019»*. Севастополь, Россия, 1768–1772.

Шашуловская, Е.А., Мосияш, С.А., Джаяни, Е.А., 2021. Биогенные элементы и фитопланктон Саратовского водохранилища в современных условиях. *Тезисы докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И.Д. Папанина РАН «Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции»*. Ярославль, Россия, 198.

Báez, J.C., Gimeno, L., Real, R., 2021. North Atlantic Oscillation and fisheries management during global climate change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 31, 319–336. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09645-z>

Björnerås, C., Weyhenmeyer, G.A., Evans, C.D., Gessner, M.O., Grossart, H.-P. et al., 2017. Widespread increases in iron concentration in European and North American freshwaters. *Global Biogeochemical Cycles* 31, 1488–1500. <https://doi.org/10.1002/2017GB005749>

Kukushkin, A.S., 2020. Effects of large-scale atmospheric oscillations on hydrometeorological conditions in the Danube River Basin in winter. *Russian Meteorology and Hydrology* 45, 630–638. <https://doi.org/10.3103/S1068373920090046>

Markovic, D., Scharfenberger, U., Schmutz, S., Voltaire, C., 2013. Variability and alterations of water temperatures across the Elbe and Danube River Basins. *Climatic Change* 119, 375–389. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0725-4>

Mineeva, N.M., 2021. Long-term dynamics of photosynthetic pigments in plankton of a large plains reservoir. *Biosystems Diversity* 29 (1), 10–16. <https://doi.org/10.15421/012102>

Ottersen, G., Planque, B., Belgrano, A., Post, E., Reid, Ph.C. Stenseth, N.C., 2001. Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia* 128, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s004420100655>

Shashulovskaya, E.A., Mosiyash, S.A., Dalechina, I.N., 2021. Long-term changes in the main indicators of the trophic state of the large plain reservoir under the influence of climatic transformation and successional processes. *Inland Water Biology* 14 (6), 627–637. <https://doi.org/10.1134/S1995082921060110>

References

Báez, J.C., Gimeno, L., Real, R., 2021. North Atlantic Oscillation and fisheries management during global climate change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 31, 319–336. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09645-z>

Björnerås, C., Weyhenmeyer, G.A., Evans, C.D., Gessner, M.O., Grossart, H.-P. et al., 2017. Widespread increases in iron concentration in European and North American freshwaters. *Global Biogeochemical Cycles* 31, 1488–1500. <https://doi.org/10.1002/2017GB005749>

Cherenkova, E.A., Sidorova, M.V., 2021. On the impact of insufficient atmospheric moistening on the low annual discharge of large rivers in European Russia. *Water Resources* 48 (3), 351–360. <https://doi.org/10.1134/S0097807821030064>

Datsenko, Yu.S., Edelstein, K.K., 2021. Vliyanie temperatury vody na razvitie fitoplanktona v vodohranilishchah [Effect of water temperature on the development of phytoplankton in reservoirs]. *Tezisy dokladov Vserossiyskoi konferentsii, posvyashchennoi 65-letiyu IBVV RAN “Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendentsii”* [Collection of Abstracts of the All-Russian Conference Dedicated to the 65th Anniversary of the Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of

Sciences “Biology of Aquatic Ecosystems in the 21st Century: Facts, Hypotheses, Trends”. Yaroslavl, Russia, 57. (In Russian).

Dalechina, I.N., Dzhayani, E.A., 2012. Fitoplankton Saratovskogo vodohranilishcha v 2000–2008 gg. [Phytoplankton of the Saratov Reservoir in 2000–2008]. *Materialy dokladov Vserossiiskoi konferentsii “Bassein Volgi v XXI veke: struktura i funktsionirovanie ekosistem vodokhranilishch”* [Materials of reports of the All-Russian conference “The Volga basin in the 21st century: the structure and functioning of reservoir ecosystems”]. Borok, Russia, 57–58. (In Russian).

Dalechina, I.N., Dzhayani, E.A., 2014. Dinamika vidovogo sostava i kolichestvennykh pokazatelej fitoplanktona v vodohranilishchah Nizhnej Volgi za 2003–2013 gg. [Dynamics of species composition and quantitative indicators of phytoplankton in the reservoirs of the Lower Volga for 2003–2013]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu GosNIORH “Rybohozyajstvennyye vodoemy Rossii: fundamentalnye i prikladnye issledovaniya”* [Materials of the international scientific conference dedicated to the 100th anniversary of State Research Institute of Lake and River Fisheries “Fishery reservoirs of Russia: fundamental and applied research”]. St. Petersburg, Russia, 287–291. (In Russian).

Dmitrieva, V.A., Nefedova, E.G., 2018. Gidrologicheskaya reaktsiya na menyayushchiesya klimaticheskie usloviya i antropogennuyu deyatel’nost’ v basseine Verkhnego Dona [Hydrological response to changing climatic conditions and anthropogenic activity in the Upper Don basin]. *Voprosy geografii [Questions of Geography]* 145, 285–297. (In Russian).

Dzhamalov, R.G., Frolova, N.L., Telegina, E.A., 2015. Winter runoff variation in European Russia. *Water Resources* 42 (6), 758–765. <http://www.doi.org/10.1134/S0097807815060032>

Gerasimova, N.A., 1996. Fitoplankton Saratovskogo i Volgogradskogo vodohranilishch [Phytoplankton of the Saratov and Volgograd reservoirs]. Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, Tolyatti, 198 p. (In Russian).

Kalinkina, N.M., Filatov, N.N., Tekanova, E.V., Balaganskij, A.F., 2018. Mnogoletnyaya dinamika stoka zheleza i fosfora v Onezhskoe ozero s vodami r. Shuya v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii [Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Lake Onega with waters of the river Shuya in the conditions of climate change]. *Regional’naya ekologiya [Regional Ecology]* 2, 65–73. (In Russian).

Kirpichnikova, N.V., Lapina, E.E., Kudryashova, V.V., 2020. Long-term dynamics of nitrogen and phosphorus concentration in subsoil water in Ivankovo reservoir drainage basin. *Water Resources* 47 (5), 721–730. <http://www.doi.org/10.1134/S0097807820050103>

Kopylov, A.I., Maslennikova, T.S., Kosolapov, D.B., 2019. Seasonal and year-to-year variations of phytoplankton primary production in the Rybinsk Reservoir: the effect of weather and climate variations. *Water Resources* 46 (3), 395–402. <http://www.doi.org/10.1134/S0097807819030114>

Korneva, L.G., Solovyeva, V.V., Mitropolskaya, I.V., Makarova, O.S., Sidelev, S.I., 2021. Mnogoletnyaya dinamika i raspredelenie fitoplanktona krupnykh ravninnykh vodohranilishch Evropeiskoi chasti RF [Long-term dynamics and distribution of phytoplankton in large lowland reservoirs of the European part of the Russian Federation]. *Tezisy dokladov Vserossiyskoi konferentsii, posvyashchennoi 65-letiyu IBVV RAN “Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendentsii”* [Collection of Abstracts of the All-Russian Conference Dedicated to the 65th Anniversary of the Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences “Biology of Aquatic Ecosystems in the 21st Century: Facts, Hypotheses, Trends”]. Yaroslavl, Russia, 102. (In Russian).

Kotlyar, S.G., 1978. Vliyanie zagryazneniya na gidrokhimicheskiiy rezhim Saratovskogo vodohranilishcha [Influence of pollution on the hydrochemical regime of the Saratov reservoir]. *Trudy Saratovskogo otdeleniya GosNIORH [Proceedings of the Saratov branch of State Research Institute of Lake and River Fisheries]* 16, 26–38. (In Russian).

- Kukushkin, A.S., 2020. Effects of large-scale atmospheric oscillations on hydrometeorological conditions in the Danube River Basin in winter. *Russian Meteorology and Hydrology* **45**, 630–638. <https://doi.org/10.3103/S1068373920090046>
- Lazareva, V.I., Sokolova, E.A., 2013. Dinamika i fenologiya zooplanktona krupnogo ravninnogo vodohranilishcha: otklik na izmenenie klimata [Dynamics and phenology of zooplankton in a large lowland reservoir: response to climate change]. *Uspekhi sovremennoi biologii [Advances in Modern Biology]* **133** (6), 564–574. (In Russian).
- Linnik, P.M., 2020. Klimatichni zmini yak vazhliiviy chinnik formuvaniya himichnogo skladu poverhnevih vod u suchasniy umovah (oglyad) [Climatic changes as an important factor in the formation of the chemical composition of surface waters in modern conditions (review)]. *Gidrobiologichnii zhurnal [Hydrobiological Journal]* **56** (5), 87–106. (In Ukrainian).
- Lozovik, P.A., Zobkova, M.V., Ryzhakov, A.V., Zobkov, M.B., Efremova, T.A., Sabylina, A.V., Efremova, T.V., 2017. Allokhthonoe i avtokhthonoe organicheskoe veshchestvo prirodnykh vod: kineticheskie i termodinamicheskie zakonomernosti transformatsii, kolichestvennyi i kachestvennyi sostavy [Allochthonous and autochthonous organic matter of natural waters: kinetic and thermodynamic patterns of transformation, quantitative and qualitative compositions]. *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]* **477** (6), 728–732. (In Russian).
- Malinin, V.N., Gordeeva, S.M., 2014. Severoatlanticheskoe kolebanie i uvlazhnenie Evropeiskoi territorii Rossii [North Atlantic Oscillation and humidification of European Russia]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie [Society. Environment. Development]* **31** (2), 191–198. (In Russian).
- Markovic, D., Scharfenberger, U., Schmutz, S., Voltaire, C., 2013. Variability and alterations of water temperatures across the Elbe and Danube River Basins. *Climatic Change* **119**, 375–389. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0725-4>
- Mineeva, N.M., 2019. Content of photosynthetic pigments in the Upper Volga reservoirs (2005–2016). *Inland Water Biology* **2–1**, 161–169. <https://doi.org/10.1134/S199508291902010X>
- Mineeva, N.M., 2021. Long-term dynamics of photosynthetic pigments in plankton of a large plains reservoir. *Biosystems Diversity* **29** (1), 10–16. <https://doi.org/10.15421/012102>
- Mineeva, N.M., Stepanova, I.E., Semadeni, I.V., 2021. Biogenic elements and their significance in the development of phytoplankton in reservoirs of the Upper Volga. *Inland Water Biology* **14** (1), 32–42. <https://doi.org/10.1134/S1995082921010089>
- Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of the flow of rivers in the Russian Federation: scientific and applied handbook], 2021. Georgievsky, V.Yu. (ed.). RIAL, St. Petersburg, Russia, 190 p. (In Russian).
- Nesterov, E.S., 2013. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean [North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean]. Triada, Moscow, Russia, 144 p. (In Russian).
- Ottersen, G., Planque, B., Belgrano, A., Post, E., Reid, Ph.C. Stenseth, N.C., 2001. Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia* **128**, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s004420100655>
- Popova, V.V., Babina, E.D., Georgiadi, A.G., 2019. Klimaticheskie faktory izmenchivosti stoka Volgi vo vtoroi polovine XX – nachale XXI vv. [Climatic factors of Volga runoff variability in the second half of the 20th – early 21st centuries] *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series]* **4**, 63–72. (In Russian).

Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverhnostnykh vod sushi [Guide to chemical analysis of terrestrial surface waters], 1977. Semenov, A.D. (ed.). Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, 542 p. (In Russian).

Shashulovskaya, E.A., 2022. O neobkhodimosti regional'noi reglamentatsii organicheskogo veshchestva i biogennykh elementov v nizhnevolzhskikh vodokhranilishchah [On the need for regional regulation of organic matter and biogenic elements in the Lower Volga reservoirs]. *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water management in Russia: problems, technologies, management]* 1, 25–38. (In Russian). https://doi.org/10.35567/19994508_2022_1_2

Shashulovskaya, E.A., Mosiyash, S.A., 2019. Gidrokhimicheskii rezhim Volgogradskogo vodokhranilishcha v podlednyi (zimnii) period [Hydrochemical regime of the Volgograd reservoir in the ice (winter) period]. *Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2019" [Collection of articles of the international scientific and practical conference "Environmental, industrial and energy security – 2019"]*. Sevastopol, Russia, 1768–1772. (In Russian).

Shashulovskaya, E.A., Mosiyash, S.A., Dalechina, I.N., 2021a. Long-term changes in the main indicators of the trophic state of the large plain reservoir under the influence of climatic transformation and successional processes. *Inland Water Biology* 14 (6), 627–637. <https://doi.org/10.1134/S1995082921060110>

Shashulovskaya, E.A., Mosiyash, S.A., Dzhayani, E.A., 2021b. Biogennye elementy i fitoplankton Saratovskogo vodokhranilishcha v sovremennykh usloviyakh [Nutrients and phytoplankton of the Saratov reservoir in modern conditions]. *Tezisy dokladov Vserossiyskoi konferentsii, posvyashchennoi 65-letiyu IBVV RAN "Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendentsii" [Collection of Abstracts of the All-Russian Conference Dedicated to the 65th Anniversary of the Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences "Biology of Aquatic Ecosystems in the 21st Century: Facts, Hypotheses, Trends"]*. Yaroslavl, Russia, 198. (In Russian).

Zhezherya, V.A., Zhezherya, T.P., Linnik, P.M., 2021. Biogenni rehovini u vodi vodoskhovishch Dniprovskogo kaskadu pislya zaregulyuvannya stoku Dnipra [Biogenic rivers near the water of the Dnieper cascade reservoirs after regulation of the Dnieper runoff]. *Gidrobiologichnii zhurnal [Hydrobiological Journal]* 6, 89–109. (In Ukrainian). Báez, J.C., Gimeno, L., Real, R., 2021. North Atlantic Oscillation and fisheries management during global climate change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 31, 319–336. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09645-z>